Transizioni digitali e fisiche per i beni museali

Mariangela Liuzzo
Dario Caraccio
Laura Floriano

Abstract

Le attuali tecnologie di rilevamento tridimensionale, di modellazione digitale, di prototipazione rapida e di comunicazione informatica hanno un ruolo centrale nella trasformazione delle esperienze museali, in risposta ad istanze di conoscenza, valorizzazione, protezione e fruizione in sicurezza. Da una parte, l'obiettivo è trovare strumenti in grado di garantire una più ampia accessibilità fisica, multisensoriale, culturale e cognitiva dei beni culturali, dall'altra, è sempre pressante il tema della sicurezza delle opere e dei fruitori all'interno dei musei. Il presente contributo intende proporre un'applicazione di realizzazione di *digital and physical twins*, caratterizzata da un approccio unico, ma versatile, di specializzazione dei dati 3D acquisiti in relazione a questi obiettivi. La sperimentazione è stata condotta all'interno di un più ampio progetto di ricerca denominato e-*WAS - An Early-Warning System for Cultural Heritage*, finanziato dal MUR e volto all'analisi del rischio, al monitoraggio, alla tutela e alla salvaguardia del patrimonio culturale, e ha visto il coinvolgimento del Museo Archeologico Regionale di Aidone (EN). Ciò ha consentito di avviare l'attività sperimentale su due sculture di pregio oggi visitabili presso il museo siciliano, ma per tanto tempo esposte al Paul Getty Museum di Los Angeles: le statue della *Dea di Morgantina* e della *Testa di Ade*.

Parole chiave
rilievo integrato, modello digitale, modello fisico, accessibilità museale, conservazione

Modelli digitali e fisici delle statue della *Dea di Morgantina* e della *Testa di Ade*.

doi.org/10.3280/oa-1016-c443

Introduzione

L'efficace applicazione degli strumenti innovativi di rilevamento, digitalizzazione e prototipazione del patrimonio culturale appare oggi consolidata sia nell'ambito delle applicazioni sperimentali già condotte sia nelle prospettive future della ricerca scientifica.
È sempre più ampio il range di beni culturali, mobili ed immobili, che possono divenire oggetto di tali sperimentazioni e le finalità per le quali tali transizioni, dal mondo fisico al digitale e viceversa, possono essere proficuamente effettuate.
Le istanze prioritarie di conoscenza, valorizzazione, protezione e fruizione in sicurezza (sia per i beni che per i fruitori) sono la base comune di tali applicazioni che accomunano, almeno in termini di principio di intenti, architetture storiche, siti e reperti archeologici, beni museali di vario tipo e dimensione.
Focalizzando l'attenzione sui beni museali, di piccole e medie dimensioni, il presente contributo intende proporre un'applicazione di realizzazione di *digital and physical twins*, caratterizzata da un approccio unico, ma declinato in modo versatile a seconda degli obiettivi specifici della modellazione.
L'attenzione dello studio è focalizzata sul processo critico che, a partire dalla fase di raccolta di dati, porta alla successiva graduale specializzazione del modello digitale, fino ad ottenere delle copie, digitali o fisiche, che non sono mai la rappresentazione fedele dell'oggetto scultoreo prescelto.
È totalmente superata, infatti, la concezione della copia del bene culturale fine a sé stessa, in quanto è evidente come essa non possa sostituire in alcun modo l'originale rischiando di assumere il significato di 'falso'. La ricerca, dunque, intende indagare sulla varietà di finalità per le quali riuscire a ricavare con rigore scientifico una copia, fisica o digitale, assume un valore, e su quali caratteristiche il processo di modellazione deve riuscire a mantenere un controllo, in funzione delle finalità stesse dell'elaborazione. Ed è questa la questione centrale che inesorabilmente orienta le scelte, anche quelle procedurali, tecnologiche e strumentali.
Procedure in grado di garantire un contenimento delle risorse economiche e di tempo assumono, inoltre, un valore aggiunto laddove oggetto delle transizioni digitali e fisiche siano non solo i beni di maggior pregio, ma quell'ampissimo patrimonio di beni scultorei e museali, esposti e non, di cui è ricco il nostro Paese.

Lo stato dell'arte

La letteratura scientifica è ricca di interessanti testi e sperimentazioni che testimoniano come da anni ormai le tecnologie di rilevamento tridimensionale, di modellazione digitale, di prototipazione rapida e di comunicazione informatica hanno un ruolo centrale nella trasformazione delle esperienze museali, consentendo di definire nuovi paradigmi di fruizione [Luther et al. 2023].
Il fenomeno di digitalizzazione dei beni museali [Tucci et al. 2017; Donadio et al. 2018; Russo, Senatore 2022] ha consentito di dare risposta alle istanze di accessibilità ai beni, spesso compromessa da diversi fattori.
I modelli digitali ad alta risoluzione, le piattaforme di realtà virtuale e aumentata consentono oggi di fruire di oggetti e siti, in alcuni casi altrimenti non raggiungibili, attraverso percorsi di scoperta culturalmente orientati e personalizzati in base alle caratteristiche specifiche degli utenti, distinti per età, interessi, *background* culturale e scientifico [Pujol et al. 2012; Gherardini et al. 2019; De Falco et al. 2021; Gabellone 2022].
Accanto ai processi basati sulla smaterializzazione dell'esperienza di fruizione, evolvono gli approcci di fruizione tattile dei beni stessi, resi possibili dalla realizzazione di copie fisiche, in differenti scale di riduzione e rese materiche, facilitate dalla rapida evoluzione e diversificazione delle tecnologie additive e sottrattive di prototipazione [Francescangeli, Monno 2010; Scopigno et al. 2014; Adami et al. 2015; Ballarin et al. 2018].
Il fine di queste esperienze è quello di garantire non solo una più ampia accessibilità fisica, ma anche senso-percettiva, culturale e cognitiva dei musei [Miglietta 2017; Capasso et al.

2020; Tiberti 2020]. Accanto a queste istanze, la comunità scientifica che opera sui beni museali sente forte il tema della sicurezza, declinato a differenti livelli come sicurezza del contenitore (museo), del contenuto (opere museali esposte e conservate), degli utenti (fruitori del museo), esposti a differenti fattori di rischio.
Anche in questo ambito, di approccio spiccatamente multidisciplinare, la possibilità di effettuare test analitici e sperimentali su copie realizzate ad hoc diviene occasione per indagare su possibili scenari di rischio, su processi di degrado e di danno e testare in sicurezza nuove o esistenti misure di prevenzione e di protezione [Visintini, Spangher 2014; Spangher et al. 2017; Tucci et al. 2017; Donadio et al. 2018; Marra et al. 2021; Alberti et al. 2023].

L'oggetto della sperimentazione

Nell'ambito di applicazione dei *digital and physical twins* ai beni museali, si vuole presentare una sperimentazione condotta all'interno di un più ampio progetto di ricerca denominato e-*WAS - An Early-Warning System for Cultural Heritage,* finanziato dal MUR e volto all'analisi del rischio, al monitoraggio e alla tutela e salvaguardia del patrimonio culturale. La convergenza di interessi con il Parco Archeologico di Morgantina e della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina (EN) e la comune attenzione verso i temi dell'innovazione tecnologica applicata all'accessibilità museale ha reso possibile ampliare anche in tale direzione gli obiettivi della sperimentazione e testarli presso il Museo Archeologico Regionale di Aidone (EN).
Sono state scelte due sculture di pregio esposte al Museo: le statue della *Dea di Morgantina*, del V secolo a.C., e della *Testa di Ade*, di più tarda età ellenistica, rinvenute probabilmente nell'omonimo sito archeologico siculo-greco, a pochi chilometri da Enna. Entrambe le statue erano state trafugate nella seconda metà del XX secolo, a causa di scavi clandestini di cui è stata oggetto l'area di Morgantina; vendute entrambe alla fondazione Paul Getty di Los Angeles, sono state restituite all'Italia all'inizio del XXI secolo.
La statua della *Dea di Morgantina* (fig. 1), alta complessivamente 215 cm per un peso totale di circa 908 kg, era originariamente costituita da un blocco monolitico di calcarenite, cavato presso l'altopiano ibleo, vicino Ragusa, confermando pertanto la provenienza siciliana della statua [Alaimo et al. 2007]. La testa e il braccio, in marmo pario, sono imperniati al corpo, secondo la cosiddetta tecnica 'pseudoacrolitica' [Marconi 2011; Marconi 2016]. Probabilmente per facilitare le operazioni di trasporto negli Stati Uniti, il corpo della statua fu sezionato in tre parti e successivamente riassemblato (fig. 2), per essere esposto, a partire dal 1988, presso il Paul Getty Museum. La Dea era posizionata sopra una base antisismica che fu successivamente donata al museo di Aidone, la stessa sulla quale attualmente si trova la statua [Castelli et al. 2022].
La *Testa di Ade* è un piccolo oggetto in terracotta dipinta, probabilmente parte di un busto o di una statua più grande [Raffiotta 2014]. Ha dimensioni reali (con un'altezza di 27,3 cm e una larghezza di 20,4 cm), è cava internamente ed è modellata a mano (vedi fig. 10, in alto a sinistra). La statua è caratterizzata da ampie tracce di colore bruno-rossastro nei riccioli della chioma, e dalla barba dipinta con rare tonalità di blu egiziano [Panzanelli et al. 2008; Raffiotta 2014]. I riccioli dipinti sono anche il motivo che hanno ricondotto la provenienza della statua al santuario dell'antica città di Morgantina. Tre riccioli, rinvenuti nell'area archeologica dopo il trafugamento della statua [Raffiotta 2013], hanno innescato degli studi comparativi fra questi e quelli presenti nella testa, confermandone l'equivalenza e avviando il processo che ha portato alla restituzione della testa da parte del Paul Getty Museum al museo regionale di Aidone.

Transizioni digitali e fisiche

Gli scopi della ricerca, e le caratteristiche intrinseche di tali opere, hanno determinato la messa a punto di un iter procedurale che partisse dall'acquisizione del dato metrico tridimensionale (fig. 3) fino ad arrivare alla prototipazione di più modelli fisici, transitando dallo

Fig. 1. La statua della Dea di Morgantina presso il Museo Archeologico Regionale di Aidone (EN).

stadio digitale. Tale stato intermedio non solo è indispensabile per le successive operazioni di stampa, ma possiede esso stesso una propria autonomia funzionale in quanto costituisce la base delle analisi e delle simulazioni digitali preparatorie alle sperimentazioni sui beni oggetto di studio, oltre che strumento di verifica *ex post*.
Con l'obiettivo di effettuare delle prove dinamiche sulla statua della *Dea di Morgantina* per determinare le caratteristiche di resistenza di questa quando posta su un'innovativa base sismica, si è resa necessaria la realizzazione di un modello fisico che possedesse caratteristiche dimensionali e inerziali quanto più prossime alla statua reale, risultando impensabile effettuare tali prove sul reperto originale. Mentre veniva ricercata la più opportuna miscela

Fig. 2. Operazioni di rimontaggio della statua della Dea di Morgantina presso il Museo Archeologico di Aidone (EN). Su concessione del Parco Archeologico di Morgantina e della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina.

cementizia che simulasse, per densità e peso specifico, il materiale della statua reale, una campagna di rilevamento tridimensionale è stata condotta su di essa.
È stato, pertanto, eseguito un rilievo integrato tramite laser scanner a differenza di fase e procedura di fotomodellazione, al fine di ottenere un modello tridimensionale digitale texturizzato in grado di restituire al meglio la complessa panneggiatura e ridurre al minimo i rumori dovuti ad un'illuminazione diretta dall'alto, che determinava inevitabilmente il formarsi di ombre. L'integrazione delle due tecniche ha consentito di ottenere un unico modello digitale a nuvola di punti, di controllata precisione metrica e qualità della resa cromatica.
Dalla mesh texturizzata (fig. 4), elaborata a partire dalla nuvola di punti, sono state estrapolate le informazioni metriche su volume, dimensioni lineari, posizione del centro d'inerzia, necessarie per lo studio preparatorio alle successive prove dinamiche. Su questo modello sono anche state effettuate delle simulazioni di stampa 3D della cassaforma atta a ospitare il getto di conglomerato, tenendo conto delle diverse tecnologie disponibili (fig. 5).
In particolare, le simulazioni digitali si sono rese indispensabili per l'analisi del più opportuno criterio di *slicing* della statua, in modo da coniugare le esigenze legate alla stampa della cassaforma e al getto di conglomerato con quelle relative alla resa formale del modello (fig. 6). Sulla base di tali considerazioni, è stato escluso il processo per sottrazione tramite macchina fresatrice CNC a 3 assi, a disposizione dell'Università di Enna 'Kore', per la bassa aderenza formale del modello finale con la statua reale, optando quindi per un processo additivo di stampa con tecnologia a filamento termoplastico, del tipo FDM. Le simulazioni digitali hanno consentito lo studio della migliore suddivisione dei vari pezzi di cassaforma (fig. 7), al fine di agevolarne il montaggio e lo sformo finale, oltre che del posizionamento delle barre di sostegno inserite nel getto, in modo tale da trovarsi sempre all'interno della statua e quanto più prossime alla proiezione orizzontale del suo baricentro geometrico (fig. 5 a destra, fig. 8).
Procedure di analisi digitale hanno consentito la verifica finale dell'aderenza della copia al vero in conglomerato rispetto al modello digitale della statua, restituendo le difformità su una mappa di scostamento tridimensionale. Un'analoga procedura ha restituito le traslazioni e le rotazioni rigide del modello fisico posto sulla base sismica causate dai test dinamici su tavola vibrante (fig. 9). L'analisi dei risultati delle mappe ottenute ha consentito di dedurre la buona approssimazione del modello fisico all'oggetto originale e l'efficacia dell'isolatore sismico adottato.
Oltre alle istanze di conservazione, che hanno richiesto la realizzazione del modello in scala reale della statua, è stato possibile rispondere alle esigenze legate ad una fruizione ampliata del bene museale, grazie alla sua riproduzione, questa volta in scala ridotta. La possibilità di leggere il bene museale toccandolo, preclusa solitamente per la delicatezza dello stesso o per le sue notevoli dimensioni, è stata offerta realizzando un altro modello fisico della Dea, questa volta in scala 1:5, stampato tramite tecnologia SLA. Questo sistema di stampa è stato preferito, rispetto ad altri, ad esempio alla tecnologia FDM, in quanto in grado di garantire il miglior compromesso tra volume e risoluzione di stampa, tra tempi e costi di produzione, e un miglior risultato in termini di scabrezza della superficie stampata (fig. 11). Anche in questo caso, il *digital twin* è risultato essenziale per simulare le possibili opzioni e giungere alla scelta.
Le stesse esigenze, legate alla fruizione tattile del bene museale, hanno portato alla realizzazione del modello digitale e fisico della *Testa di Ade* in scala 1:2. Per la creazione del *digital twin* si è ricorso alla medesima procedura usata per la statua della Dea e cioè un rilievo integrato con laser scanner e fotomodellazione (fig. 10). Sul modello ottenuto sono state testate due tecnologie di stampa, a filamento e di tipo SLA. Entrambe hanno mostrato buoni risultati in termini di fedeltà formale e di risorse di tempi e costi, ma la stampa con resina è risultata estremamente più efficace nei riguardi della finitura superficiale, aspetto peculiare per la finalità di utilizzo prevista (fig. 11).

Conclusioni

La ricerca avviata ha consentito di mettere a punto un protocollo operativo volto alla digitalizzazione dei beni museali e alla successiva specializzazione del modello digitale secondo procedure mirate ad ottenere copie, digitali o fisiche, al vero o in scala di riduzione,

		Dea di Morgantina Goddess of Morgantina	Testa di Ade Head of Hades
RILIEVO FOTOGRAMMETRICO PHOTOGRAMMETRIC SURVEY	N. di foto N. of images	118	89
	Distanza dall'oggetto Distance from the object	1,92m ÷ 3,34m	1,26m ÷ 1,49m
	Angolo di inclinazione della fotocamera Camera tilt angle	+17° ÷ -24°	+26° ÷ -30°
	Risoluzione Resolution	4644x3084 px	4644x3084 px
	Strumento Instrument	Nikon D3100	Nikon D3100
	Formato immagine Image size	NEF	NEF
	N. livelli a tutto tondo N. of levels all-round	5	4
RILIEVO LASER SCANNER LASER SCANNER SURVEY	N. di scansioni N. of scans	37	7
	Strumento Instrument	FARO Focus 3D S 120	FARO Focus 3D S 120
	Distanza scansioni Scan distance	1,92m ÷ 2,75m	1,24m ÷ 1,56m

Fig. 3. Tabella riassuntiva dei dati tecnici delle operazioni di rilievo.

Fig. 4. Modello *mesh* texturizzato della statua della *Dea di Morgantina*.

Fig. 5. Studio del modello digitale della statua della *Dea di Morgantina* per la determinazione delle informazioni geometriche (a sinistra), l'estrapolazione del 'negativo' per la progettazione delle casseforme (al centro), il posizionamento delle barre di fissaggio (a destra).
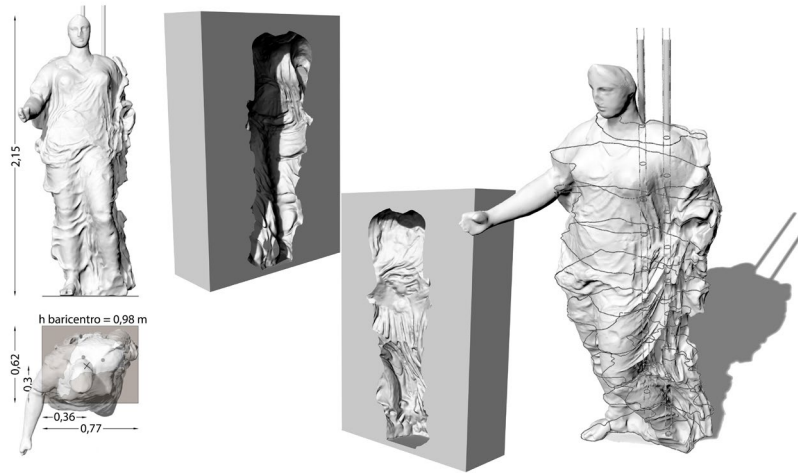
Fig. 6. Diverse opzioni di *slicing* del modello ai fini della prototipazione mediante CNC a tre assi delle casseforme: sezioni cilindriche verticali, spessore 2 cm (a sinistra); sezioni orizzontali raccordate mediante *loft*, spessore 3 cm (al centro); sezioni cilindriche orizzontali, spessore 2 cm (a destra).
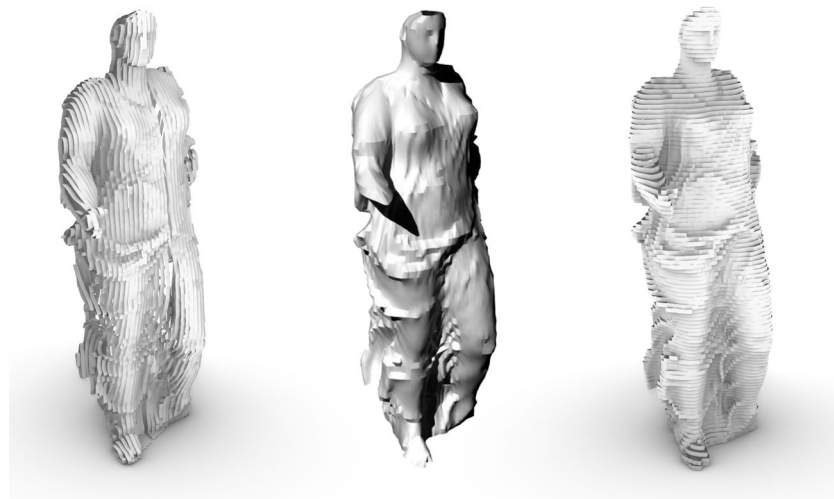
Fig. 7. Suddivisione del modello digitale per la stampa delle casseforme mediante stampante FDM.
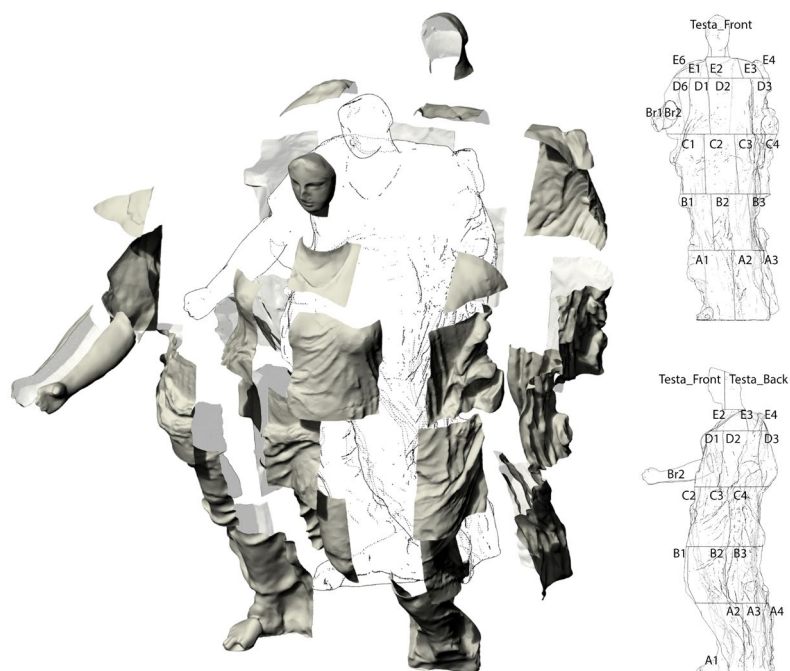
Fig. 8. Fasi del getto e finitura del modello in scala 1:1 della *Dea di Morgantina*, presso il Centro L.E.D.A. dell'Università di Enna 'Kore'.

Fig. 9. Modello a nuvola di punti del *physical twin* della *Dea di Morgantina* posto su dispositivo antisismico (a sinistra), e mappe di scostamento del modello, prima e dopo i test dinamici (a destra).
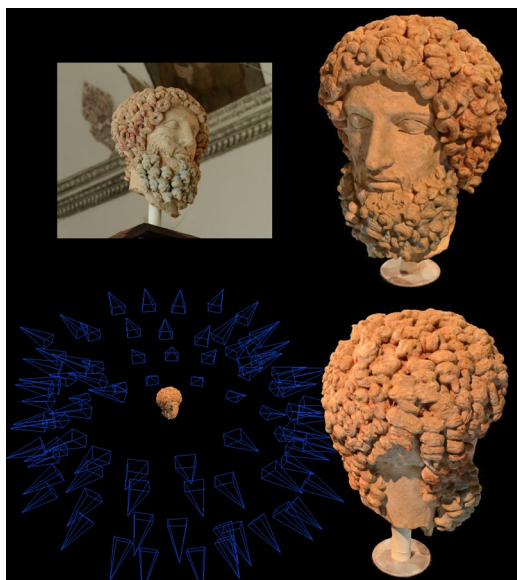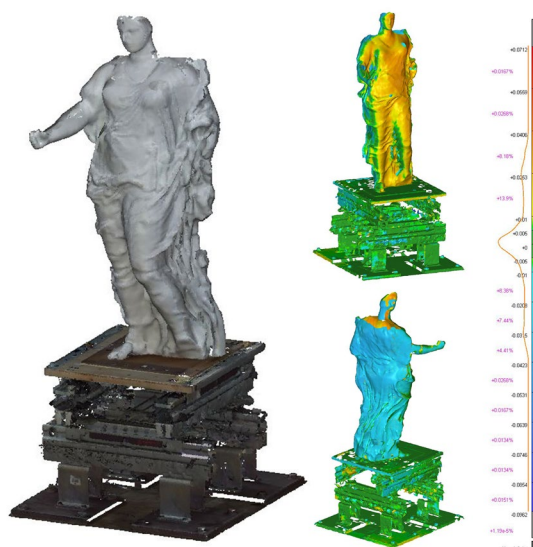
Fig. 10. La statua della *Testa di Ade*, presso il Museo Archeologico di Aidone (EN); procedura di fotomodellazione e modello *mesh* texturizzato.

Fig. 11. *Physical twins* in scala ridotta della *Testa di Ade*, scala 1:2 (a sinistra), e della *Dea di Morgantina*, scala 1:5 (a destra), per la fruizione tattile dei beni museali.

in grado di rispondere a specifiche istanze di conoscenza, valorizzazione e protezione. L'attività svolta ha già ottenuto delle ricadute effettive sui beni museali, sia in termini di contributo alla validazione di un prototipo di base isolante innovativa ed efficace, nell'ambito della ricerca e-*WAS*, sia in termini di lettura tattile delle due sculture prescelte che è attualmente promossa dal Museo di Aidone.

Si ritiene, però, indispensabile uno sviluppo futuro di tale attività in due direzioni. Da una parte, a partire dal modello digitale dei due beni già acquisiti, avviare ulteriori percorsi di specializzazione dei dati 3D, finalizzati ad ampliare ulteriormente le tipologie di utenza e le modalità/contenuti di fruizione. Dall'altra, aumentare il numero di esemplari su cui applicare il protocollo operativo suddetto, attuando scelte tecnologiche bilanciate in termini di accuratezza dei risultati, da una parte, ed impegno economico e di tempo, dall'altra.

L'idea di fondo è che l'innovazione tecnologica applicata ai beni museali debba configurarsi sempre più non come un insieme di interventi episodici e frammentari, ma secondo azioni progettuali sistematiche e multidisciplinari, in grado di coniugare sinergicamente temi culturali, sociali, tecnologici, di sicurezza e di accessibilità.

Crediti

La ricerca è stata condotta congiuntamente dagli autori, nell'ambito delle attività del *Laboratorio di Rilievo e Rappresentazione* dell'Università di Enna 'Kore', sotto la supervisione di M. Liuzzo.
Per la responsabilità redazionale, M. Liuzzo: 'Introduzione', 'Lo stato dell'arte', 'Conclusioni'; D. Caraccio: 'L'oggetto della sperimentazione'; L. Floriano: 'Transizioni digitali e fisiche'.

Ringraziamenti

Le prove dinamiche sperimentali sul modello della statua della *Dea di Morgantina* sono state condotte presso il centro L.E.D.A.
Le stampe 3D sono state prodotte presso 3DItaly (RG), presso il *Laboratorio di Rilievo e Rappresentazione* e presso EASY3D (PA).
Si ringraziano, pertanto, il prof. Francesco Castelli, responsabile Unikore della ricerca e-WAS, il prof. Giacomo Navarra, responsabile del Laboratorio di Dinamica Sperimentale del centro L.E.D.A. dell'Università di Enna 'Kore', l'arch. Liborio Calascibetta, Direttore del Parco Archeologico di Morgantina e della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina (EN); l'arch. Egidio Di Maggio, per la collaborazione alle attività svolte.

Riferimenti bibliografici

Adami A. et al. (2015). The bust of Francesco II Gonzaga: from digital documentation to 3D printing. In *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W3, pp.9-15. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-9-2015> (consultato il 4 febbraio 2023).

Alaimo R. et al. (2007). Petrographic and micropalaeontological data in support of a Sicilian origin for the Statue of Aphrodite. In M. Greenberg (a cura di). *Cult Statue of a Goddess, Summary of Proceedings from a Workshop*, pp.23-28. Los Angeles: Getty Publications.

Alberti E. et al. (2023). Seismic protection of the Goddess of Morgantina statue through an innovative base-isolation device: validation by shake-table tests. In G. P. Cimellaro (a cura di). *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. WCSI 2022*. Torino, settembre 11-15, 2022, pp.717-725. Switzerland AG: Springer.

Ballarin M., Balletti C., Vernier P. (2018). Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, pp.55-62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018> (consultato il 4 febbraio 2023).

Capasso L. et al. (a cura di). *Museologia Scientifica Memorie. Atti del XXIX Congresso ANMS L'Accessibilità nei Musei. Limiti, risorse e strategie*. Chieti, ottobre 23-25, 2019. Chieti: Edicola.

Castelli F. et al. (2022), Shake-table tests for the dynamic characterisation of an innovative isolator for seismic protection of statues. In R. Lancellotta, C. Viggiani, A. Flora, F. de Silva, L. Mele (a cura di). *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III,* pp.389-400. Milton Park: Taylor and Francis.

De Falco M. et al. (2021). Dal digitale al materiale: design e tecnologie digitali per la creazione di kit esperienziali per il Museo Archeologico Nazionale di Napoli. In *Archeologia e Calcolatori*, n. 32.1, pp.251-268. <http://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=1137> (consultato il 4 febbraio 2023).

Donadio E. et al. (2018). Three-Dimensional (3D) Modelling and Optimization for Multipurpose Analysis and Representation of Ancient Statues. In F. Remondino, A. Georgopoulos, D. González-Aguilera, P. Agrafiotis (a cura di). *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, pp.95-118. Basel, Switzerland: MDPI.

Francescangeli R., Monno A. (2010). Tecnologie 3D per i musei. In *Museologia Scientifica nuova serie*, n. 4 (1-2), pp.111-117.

Gabellone F. (2022). Digital Twin: a new perspective for cultural heritage management and fruition. In *Acta IMEKO*, vol. 11, n. 1, article 5. <https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-11%20%282022%29-01-05> (consultato il 4 febbraio 2023).

Gherardini F., Santachiara M., Leali F. (2019). Enhancing heritage fruition through 3D virtual models and augmented reality: an application to Roman artefacts. In *Virtual Archaeology Review*, n. 10(21), pp.67-79. <https://doi.org/10.4995/var.2019.11918> (consultato il 4 febbraio 2023).

Luther W. et al. (2023). Digital Twins and Enabling Technologies in Museums and Cultural Heritage: An Overview. In *Sensors 2023*, n. 23, p.1583. <https://doi.org/10.3390/s23031583> (consultato il 4 febbraio 2023).

Marconi C. (2011). L'identificazione della 'Dea' di Morgantina. In *Prospettiva – Rivista di storia dell'arte antica e moderna,* n. 141-142/2011, pp.2-31.

Marconi C. (2016), The Goddess from Morgantina. In C. Kunze (2016). *Antike plastic lieferung 31*, pp.1-13. Graz: Verlag.

Marra A. et al. (2021). Combining Integrated Informative System and Historical Digital Twin for Maintenance and Preservation of Artistic Assets. In *Sensors 2021*, n. 21, p.5956. <https://doi.org/10.3390/s21175956> (consultato il 4 febbraio 2023).

Miglietta A.M. (2017). Il museo accessibile: barriere, azioni e riflessioni. In *Museologia scientifica nuova serie,* n.11, pp.11-30.

Panzanelli R., Schmidt E.D., Lapatin K. (a cura di). (2008). *The Color of Life: Polychromy in Sculpture from Antiquity to the Present*. Los Angeles: Getty Publications.

Pujol L. et al. (2012). Personalizing Interactive Digital Storytelling in Archaeological Museums: the CHESS Project. In *Archaeology in the Digital Era. 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Conference proceedings. Southampton, UK, marzo 26-29, 2012, pp.77-90. Amsterdam: Amsterdam University Press.

Raffiotta S. (2013). *Caccia ai tesori di Morgantina*. Caltanissetta: Arbor Sapientae.

Raffiotta S. (2014). Una Divinità Maschile per Morgantina. In *Le Carnet de L'ACoST*, n. 11/2014, pp.1-8.

Russo M., Senatore L.J. (2022). Low-cost 3D techniques for real sculptural twins in the museum domain. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* XLVIII-2/W1-2022, pp.229–236. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-229-2022> (consultato il 4 febbraio 2023).

Scopigno R. et al. (2014). Digital fabrication technologies for cultural heritage (STAR). In *EG GCH 2014 - 12th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. Conference proceedings*. Darmstadt, Germany, ottobre 6-8, 2014, pp.75-85. Goslar: Eurographics Association.

Spangher A. et al. (2017). Geomatic 3D Modeling of a statue (also) for structural analysis and risk evaluation: the example of San Giovannino Martelli in Florence. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*., XLII-5/W1, pp.61-68. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-61-2017> (consultato il 4 febbraio 2023).

Tiberti V. (2020). *Il museo sensoriale. L'accessibilità culturale e l'educazione artistica ed estetica per le persone con minorazione visiva nei musei del comune di Roma*. Roma: Sapienza Università.

Tucci G. et al. (2017). High quality 3D models and their use in a cultural heritage conservation project. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*., XLII-2/W5, pp.687-693. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-687-2017> (consultato il 4 febbraio 2023).

Visintini D., Spangher A. (2014). Il contributo della Geomatica per l'analisi strutturale dei beni culturali: l'esempio di una statua romana lesionata. In *Atti 18a Conferenza Nazionale ASITA*. Firenze, ottobre 14-16, 2014, pp. 1229-1236.

Autori
Mariangela Liuzzo, Università degli Studi di Enna "Kore", mariangela.liuzzo@unikore.it
Dario Caraccio, Università degli Studi di Enna "Kore", dario.caraccio@unikore.it
Laura Floriano, Università degli Studi di Enna "Kore", laura.floriano@unikore.it

Per citare questo capitolo: Liuzzo Mariangela, Caraccio Dario, Floriano Laura (2023). Transizioni digitali e fisiche per i beni museali/Digital and Physical Transitions for Museum Asset. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2894-2913.

 Isbn 9788835155119

Digital and Physical Transitions for Museum Asset

Mariangela Liuzzo
Dario Caraccio
Laura Floriano

Abstract

Today's three-dimensional surveys, digital modelling, rapid prototyping and IT communication technologies play a central role in the transformation of museum experiences, in order to meet the demands of knowledge, valorisation, protection and safe use.
The goal, on the one hand, is to find tools that can ensure broad physical, multi-sensorial, cultural, and cognitive access to cultural heritage sites. On the other hand, it is necessary to deal with the always pressing issue of safety, regarding both museum visitors and cultural assets. This paper proposes an application of digital and physical twins' realisation, characterized by a unique but multipurpose approach concerning the specialization of the acquired 3D data in relation to these objectives.
The experimentation was conducted as part of a broader research project called e-*WAS - An Early-Warning System for Cultural Heritage*, funded by the MUR and aimed at risk analysis, monitoring, protection and safeguarding of cultural heritage. The project involved the Regional Archaeological Museum of Aidone (EN), thus making it possible to start the experimental activity on two valuable sculptures, now exhibited at the Sicilian Museum but for a long time kept at the Paul Getty Museum in Los Angeles: the statues of the *Goddess of Morgantina* and the *Head of Hades*.

Keywords
Integrated Survey, Digital Model, Physical Model, Museum Accessibility, Conservation

Digital and physical models of the statues of the *Goddess of Morgantina* and the *Head of Hades*.

doi.org/10.3280/oa-1016-c443

Introduction

The effective use of innovative tools for surveying, digitizing, and prototyping cultural heritage appears to be well-established, both in terms of experimental applications already undertaken and in terms of future prospects for scientific research.
There is a growing range of cultural assets, both movable and immovable, that can become the subject of such experiments in transition from the physical to the digital world, and vice versa, providing extensive opportunities of use. The overarching instances of knowledge, enhancement, protection, and safe enjoyment (for both assets and users) are the common basis of such applications, which unite, in their principle of intent, historical architecture, archaeological sites and artifacts, and museum assets of various types and sizes.
With a focus on small and medium museum assets, this paper proposes an application of realization of digital and physical twins, characterized by a unique but flexible approach, according to the specific objectives of modelling.
The study is centred on the critical process that begins with the 3D data collection and leads to the subsequent gradual specialization of a digital model, up to the realisation of digital or physical copies, which will obviously never be a faithful representation of the chosen sculpture.
In fact, the notion of the copy of a cultural object as an end in itself is completely outdated, since it is apparent that it cannot replace the original in any way, and it risks to take on the meaning of 'fake'.
For this reason, it is necessary to examine how many different purposes are served by deriving a physical or digital replica with scientific accuracy, and the characteristics on which a modelling process must keep control, according to these very purposes of processing. This is the central question that inevitably guides procedural, technological and instrumental choices.
The issue is particularly important for those applications that concern not only the most valuable objects, but also the very large heritage of sculptures and museum objects, both exhibited and not, in which our country is rich. For these cases, the procedures must be able to guarantee the containment of economic and time resources.

The state of the art

The scientific literature is full of interesting texts and experiments that demonstrate how the technologies of three-dimensional surveying, digital modelling, rapid prototyping and computer communication have played a central role in transforming the museum experience for years, enabling new modes of enjoyment to be defined [Luther et al. 2023].
The digitization of museum heritage [Tucci et al. 2017; Donadio et al. 2018; Russo, Senatore 2022] has made it possible to meet the demand for accessibility to collections, which is often compromised by several factors.
Today, high-resolution digital models and virtual and augmented reality platforms make it possible to enjoy objects and sites that are in some cases otherwise inaccessible, through culturally oriented discovery paths tailored to the specific characteristics of the users, differentiated by age, interests, cultural and scientific background [Pujol et al. 2012; Gherardini et al. 2019; De Falco et al. 2021; Gabellone 2022].
Alongside these processes, based on the dematerialization of the fruition experience, approaches of tactile fruition of museum assets are evolving, through the creation of physical copies in different scales of reduction and materials, facilitated by the rapid evolution and diversification of additive and subtractive prototyping technologies [Francescangeli, Monno 2010; Scopigno et al. 2014; Adami et al. 2015; Ballarin et al. 2018].
The aim of these experiences is to ensure a broader accessibility of museums, not only physical, but also sensory, cultural and cognitive [Miglietta 2017; Capasso et al. 2020; Tiberti 2020]. In addition to these demands, the scientific community working in the field of museum objects is strongly concerned with the issue of security, declined at different levels as se-

curity of the container (museum), of the content (museum works exhibited and preserved) and of the users (museum visitors), exposed to different risk factors.
The possibility of performing analytical and experimental tests on ad hoc copies through the implementation of a multidisciplinary approach makes it possible to study potential risk scenarios, degradation and damage processes, and enables the safe testing of new or existing prevention and protection measures [Visintini, Spangher 2014; Spangher et al. 2017; Tucci et al. 2017; Donadio et al. 2018; Marra et al. 2021; Alberti et al. 2023].

The object of experimentation

In the application field of digital and physical twins to museum heritage, we would like to present an experiment carried out within a broader research project called *e-WAS - An Early-Warning System for Cultural Heritage,* funded by the MUR, aimed at risk analysis, monitoring, protection and preservation of cultural heritage. The commonality of interests with the Archaeological Park of Morgantina and the Villa Romana del Casale in Piazza Armerina, and the shared focus on the theme of technological innovation applied to museum accessibility, allowed the research objectives to be extended also in this direction, as well as to test them at the Regional Archaeological Museum of Aidone (EN).
Two valuable sculptures exhibited in the museum were chosen: the statues of the *Goddess of Morgantina*, from the 5th century B.C., and the *Head of Hades*, from the later Hellenistic period, probably found in the homonymous Sicilian-Greek archaeological site, a few kilometres from Enna. Both statues were stolen in the second half of the 20th century during clandestine excavations in the Morgantina area, then sold to the Paul Getty Foundation in Los Angeles (USA) and later returned to Italy at the beginning of the 21st century.
The statue of the *Goddess of Morgantina* (fig. 1), which is 215 cm in tall and weighs about 908 kg, was originally made from a monolithic block of calcarenite, quarried on the Hyblean plateau near Ragusa (Sicily), thus confirming the statue's Sicilian origins [Alaimo et al. 2007]. The head and arm, made of Parian marble, are pivoted on the body, in the so-called 'pseudoacrolithic' technique [Marconi 2011; Marconi 2016]. Presumably to facilitate transportation to the United States, the body of the statue was disassembled into three parts and later reassembled (fig. 2), to be displayed at the Paul Getty Museum where it had been since 1988. The goddess was placed on an earthquake-proof base-isolation device, which was later donated to the museum in Aidone. This is the same isolator on which the statue currently stands [Castelli et al. 2022].
The *Head of Hades* is a small painted terracotta object, probably part of a larger bust or statue [Raffiotta 2014]. It is life-size (27.3 cm high and 20.4 cm wide), internally hollow, and hand modelled (see fig.10, top left). The statue is characterized by broad traces of reddish-brown paint in the curls of the hair, and a beard painted in rare shades of Egyptian blue [Panzanelli et al. 2008; Raffiotta 2014]. The painted curls are also the reason for tracing the statue's origins to the sanctuary of the ancient city of Morgantina. Three curls, found in the archaeological area after the statue was stolen [Raffiotta 2013], triggered comparative studies between these and those present on the head, confirming their equivalence and initiating the process that led to the return of the head by the Paul Getty Museum to the regional museum of Aidone.

Digital and physical transitions

The objectives of the research and the intrinsic characteristics of the selected artworks led to the implementation of a procedure that starts from the acquisition of 3D metric data (fig. 3), up to the prototyping of several physical models, passing through to the digital stage. This intermediate state, which is indispensable for subsequent printing operations, is also the basis for preliminary analyses and digital simulations necessary to test the objects under investigation, as well as for *ex post* verification tool. With the aim of carrying out dynamic tests

Fig. 1. The statue of the *Goddess of Morgantina* at the Regional Archaeological Museum of Aidone (EN).

on the statue of the *Goddess of Morgantina*, in order to determine its strength characteristics when placed on an innovative seismic base, it was necessary to create a physical model with dimensional and inertial characteristics as close as possible to the real statue, since it was inconceivable to conduct such tests on the original sculpture. A 3D survey campaign was carried out on the statue while the most suitable concrete mixture was being sought, in order to simulate the density and the specific weight of the material of the statue itself.
A 3D survey was conducted using a phase-shift laser scanner integrated with photo-modelling technique, in order to minimize the interference caused by direct lighting from above, which inevitably led to the formation of shadows. Therefore, a textured digital 3D model

Fig. 2. Phases of reassembling the statue of the *Goddess of Morgantina* at the Archaeological Museum of Aidone (EN). Courtesy Morgantina and Villa Romana del Casale in Piazza Armerina Archeological Park.

best approximating the complex drapery of the statue was obtained. The integration of the two techniques resulted in a single digital point cloud model with controlled metric accuracy and colour rendering quality.
From the textured mesh (fig. 4) processed from the point cloud, metric information about volume, linear dimensions, and position of the centre of inertia were extracted, that were necessary for the preliminary study of the subsequent dynamic tests. This model was also used to carry out 3D printing simulations of the formwork for concrete casting, taking into account the different prototyping technologies available (fig. 5).
In particular, digital simulations were indispensable to analyse the most appropriate slicing criterion for the statue, in order to combine the needs related to the formwork printing and the concrete casting with those related to the final shape of the model (fig. 6). Based on these considerations, a subtraction process using a 3-axis CNC milling machine, available at the 'Kore' University of Enna, was ruled out due to the low formal adherence of the final model to the real statue. Therefore, an additive printing process using FDM thermoplastic filament technology, was chosen. Digital simulations made it possible to study the best subdivision of the formwork (fig. 7), to facilitate its assembly and disassembly, as well as the positioning of vertical support bars inserted in the casting, in order to check that they were always inside the statue and as close as possible to the horizontal projection of its geometric barycentre (fig. 5 right, fig. 8).
Digital analysis procedures enabled the final verification of the concrete copy's adherence to the digital model of the real statue. Displacements were presented on a 3D deviation map. A similar procedure showed the rigid translations and rotations caused by dynamic shaking-table tests of the physical model placed on the seismic base (fig. 9). The analysis of the deviation maps thus obtained made it possible to check the close approximation of the physical model to the original object and the effectiveness of the adopted seismic isolator.
In addition to instances of preservation, which required the creation of a full-scale model of the statue, needs related to the extended enjoyment of it could be met through its reproduction on a smaller scale. The possibility of touching the museum object, usually ruled out because of its fragility or its considerable size, was provided by the creation of another physical model of the goddess, this time on a 1:5 scale, printed with SLA technology. This printing technology was preferred over others, such as FDM one, because it offered the best compromise between print volume and resolution, between production time and cost, and it showed a better result in terms of printed surface roughness (fig. 11). Again, the digital twin was essential to simulate the possible options and to arrive at the best choice.
The same requirements, related to the tactile enjoyment of the museum object, led to the creation of the digital and physical model of the *Head of Hades* at a 1:2 scale. The digital twin was created using the same procedure as the statue of the goddess, namely an integrated survey with laser scanning and photo-modelling techniques (fig. 10). Two printing technologies, FDM and SLA, were tested on the digital 3D model. Both showed good results in terms of formal fidelity and time and cost resources, but SLA printing was much more effective with regard to surface quality, which is an important aspect for the intended use (fig. 11).

Conclusions

This research has made it possible to develop an operational protocol aimed at the digitalisation of museum collections and the subsequent specialization of the digital model in order to obtain digital or physical copies, either full-size or reduced, that are responsive to specific instances of knowledge, valorisation, and protection.
The activity carried out so far has already had an important impact on museum collections, both in terms of contributing to the validation of an innovative and effective seismic isolator prototype, as part of the *e-WAS* research, and in terms of the tactile enjoyment of the two selected sculptures, promoted by the Museum of Aidone.
Future development of this activity in two directions is considered essential. On the one hand, further specialization of the 3D data should be initiated in order to broaden the types

		Dea di Morgantina Goddess of Morgantina	Testa di Ade Head of Hades
Rilievo fotogrammetrico Photogrammetric survey	N. di foto N. of images	118	89
	Distanza dall'oggetto Distance from the object	1,92m ÷ 3,34m	1,26m ÷ 1,49m
	Angolo di inclinazione della fotocamera Camera tilt angle	+17° ÷ -24°	+26° ÷ -30°
	Risoluzione Resolution	4644x3084 px	4644x3084 px
	Strumento Instrument	Nikon D3100	Nikon D3100
	Formato immagine Image size	NEF	NEF
	N. livelli a tutto tondo N. of levels all-round	5	4
Rilievo laser scanner Laser scanner survey	N. di scansioni N. of scans	37	7
	Strumento Instrument	FARO Focus 3D S 120	FARO Focus 3D S 120
	Distanza scansioni Scan distance	1,92m ÷ 2,75m	1,24m ÷ 1,56m

Fig. 3. Summary table of technical data of survey activities.

Fig. 4. Textured mesh model of the statue of the *Goddess of Morgantina*.
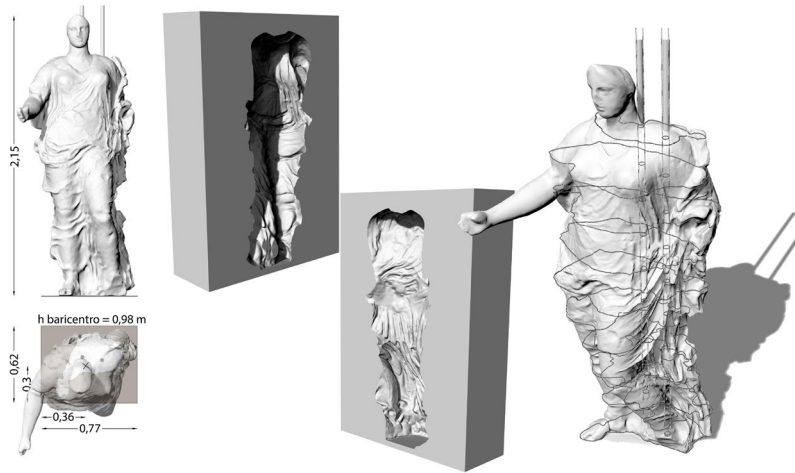
Fig. 5. Determining of the geometric information of the digital model of the statue of the *Goddess of Morgantina* (left), extrapolating of the 'negative' for the design of the formwork (centre), the positioning of the fixing bars (right).
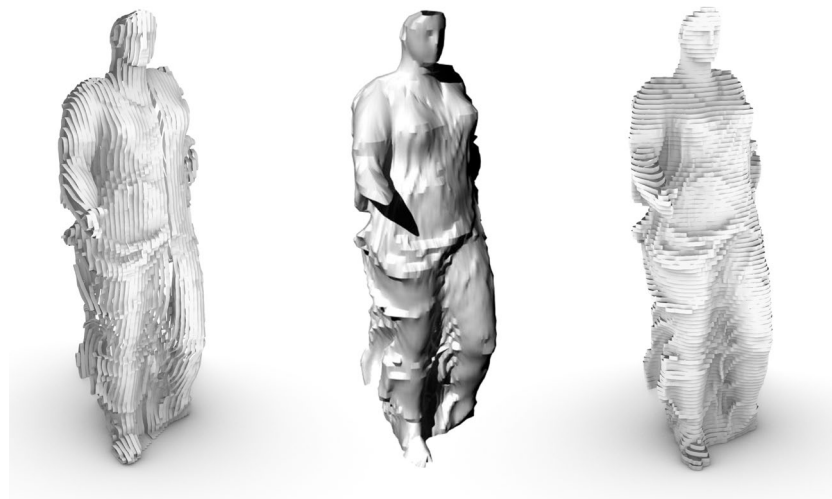
Fig. 6. Different slicing options of the model for the formwork prototyping by three-axis CNC: vertical cylindrical sections, 2 cm thick (left); horizontal sections joined by loft, 3 cm thick (middle); horizontal cylindrical sections, 2 cm thick (right).
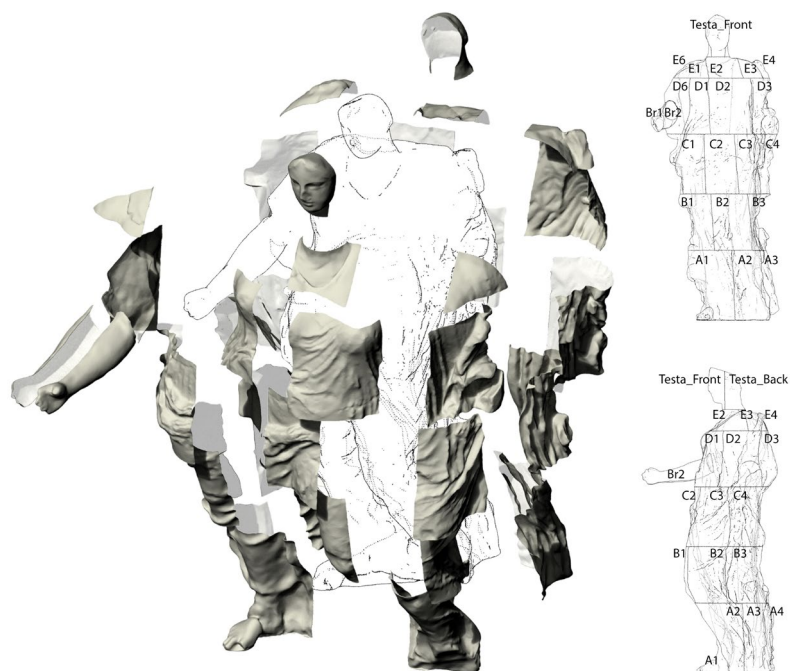
Fig. 7. Digital model subdivision for formwork printing by FDM printer.

Fig. 8. Casting stages and finishing of the 1:1 scale model of the *Goddess of Morgantina* at the L.E.D.A. Centre of the University of Enna 'Kore'.

Fig. 9. Point cloud model of the physical twin of the *Goddess of Morgantina* placed on anti-seismic device (left), and model deviation maps, before and after dynamic testing (right).
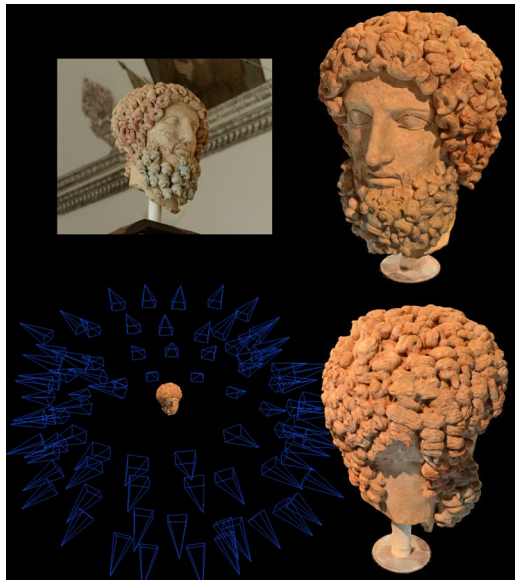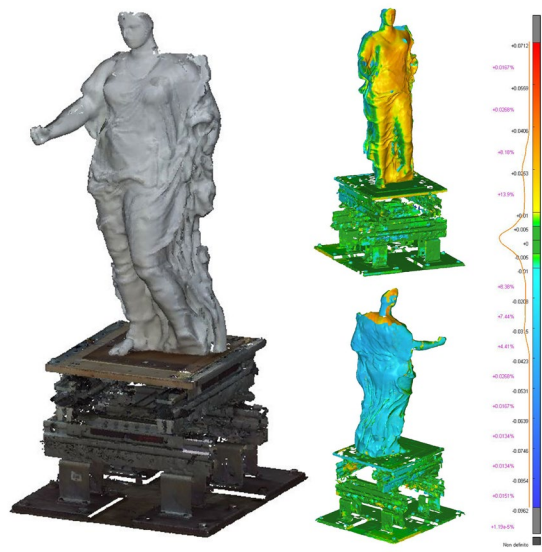
Fig. 10. The statue of *Head of Hades,* at the Archaeological Museum of Aidone (EN); photomodelling procedure and textured mesh model.

Fig. 11. Small-scale physical twins of the *Head of Hades*, scale 1:2 (left), and the *Goddess of Morgantina*, scale 1:5 (right), for the tactile enjoyment of museum assets.

of users and mode/content of use, starting from the digital model of the two objects already acquired. On the other, it is advisable to increase the number of samples on which to apply the operational protocol described above, implementing balanced technological choices in terms of accuracy of results, as well as economic and time constraints.
The basic idea is that technological innovation applied to museum collections should increasingly be configured not as a series of episodic and fragmentary interventions, but according to systematic and multidisciplinary design actions, capable of synergistically combining cultural, social, technological, security, and accessibility issues.

Credits

The research was conducted jointly by the authors within the activities of the *Laboratory of Surveying and Representation* of the University of Enna 'Kore', under the supervision of M. Liuzzo.
For the editorial responsibility, M. Liuzzo: 'Introduction', 'The state of the art', 'Conclusions'; D. Caraccio: 'The object of experimentation'; L. Floriano: 'Digital and physical transitions'.

Acknowledgements

Experimental dynamic tests on the model of the statue of the *Goddess of Morgantina* were conducted at the L.E.D.A. Centre. 3D prints were produced at 3DItaly (RG), at the Unikore *Laboratory of Survey and Representation* and at EASY3D (PA).
We would like to thank Prof. Francesco Castelli, head of the e-WAS research at Unikore; Prof. Giacomo Navarra, head of the Experimental Dynamics Laboratory of the L.E.D.A. Centre of the University of Enna 'Kore'; arch. Liborio Calascibetta, director of the Archaeological Park of Morgantina and the Villa Romana del Casale in Piazza Armerina (EN); arch. Egidio Di Maggio, for their collaboration in the activities carried out.

References

Adami A. et al. (2015). The bust of Francesco II Gonzaga: from digital documentation to 3D printing. In *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W3, pp.9-15. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-9-2015> (accessed 4 February 2023).

Alaimo R. et al. (2007). Petrographic and micropalaeontological data in support of a Sicilian origin for the Statue of Aphrodite. In M. Greenberg (Ed.). *Cult Statue of a Goddess, Summary of Proceedings from a Workshop*, pp.23-28. Los Angeles: Getty Publications.

Alberti E. et al. (2023). Seismic protection of the Goddess of Morgantina statue through an innovative base-isolation device: validation by shake-table tests. In G. P. Cimellaro (Ed.). *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. WCSI 2022*. Turin, September 11-15, 2022, pp.717-725. Switzerland AG: Springer.

Ballarin M., Balletti C., Vernier P. (2018). Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, pp.55-62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018> (accessed 4 February 2023).

Capasso L. et al. (a cura di). *Museologia Scientifica Memorie. XXIX Congresso ANMS L'Accessibilità nei Musei. Limiti, risorse e strategie. Conference proceedings*. Chieti, October 23-25, 2019. Chieti: Edicola.

Castelli F. et al. (2022), Shake-table tests for the dynamic characterisation of an innovative isolator for seismic protection of statues. In R. Lancellotta, C. Viggiani, A. Flora, F. de Silva, L. Mele (Eds.). *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III,* pp.389-400. Milton Park: Taylor and Francis.

De Falco M. et al. (2021). Dal digitale al materiale: design e tecnologie digitali per la creazione di kit esperienziali per il Museo Archeologico Nazionale di Napoli. In *Archeologia e Calcolatori*, No. 32.1, pp.251-268. <http://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=1137> (accessed 4 February 2023).

Donadio E. et al. (2018). Three-Dimensional (3D) Modelling and Optimization for Multipurpose Analysis and Representation of Ancient Statues. In F. Remondino, A. Georgopoulos, D. González-Aguilera, P. Agrafiotis (Eds.). *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, pp.95-118. Basel, Switzerland: MDPI.

Francescangeli R., Monno A. (2010). Tecnologie 3D per i musei. In *Museologia Scientifica nuova serie*, No. 4 (1-2), pp.111-117.

Gabellone F. (2022). Digital Twin: a new perspective for cultural heritage management and fruition. In *Acta IMEKO*, Vol. 11, No. 1, article 5. <https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-11%20%282022%29-01-05> (accessed 4 February 2023).

Gherardini F., Santachiara M., Leali F. (2019). Enhancing heritage fruition through 3D virtual models and augmented reality: an application to Roman artefacts. In *Virtual Archaeology Review*, No. 10(21), pp.67–79. <https://doi.org/10.4995/var.2019.11918> (accessed 4 February 2023).

Luther W. et al. (2023). Digital Twins and Enabling Technologies in Museums and Cultural Heritage: An Overview. In *Sensors 2023*, No. 23, p.1583. <https://doi.org/10.3390/s23031583> (accessed 4 February 2023).

Marconi C. (2011). L'identificazione della 'Dea' di Morgantina. In *Prospettiva – Rivista di storia dell'arte antica e moderna,* No. 141-142/2011, pp.2-31.

Marconi C. (2016), The Goddess from Morgantina. In C. Kunze (2016). *Antike plastic lieferung 31*, pp.1-13. Graz: Verlag.

Marra A. et al. (2021). Combining Integrated Informative System and Historical Digital Twin for Maintenance and Preservation of Artistic Assets. In *Sensors 2021*, No. 21, p.5956. <https://doi.org/10.3390/s21175956> (accessed 4 February 2023).

Miglietta A.M. (2017). Il museo accessibile: barriere, azioni e riflessioni. In *Museologia scientifica nuova serie,* No.11, pp.11-30.

Panzanelli R., Schmidt E.D., Lapatin K. (Eds.). (2008). *The Color of Life: Polychromy in Sculpture from Antiquity to the Present*. Los Angeles: Getty Publications.

Pujol L. et al. (2012). Personalizing Interactive Digital Storytelling in Archaeological Museums: the CHESS Project. In *Archaeology in the Digital Era. 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Conference proceedings*. Southampton, UK, March 26-29, 2012, pp.77-90. Amsterdam: Amsterdam University Press.

Raffiotta S. (2013). *Caccia ai tesori di Morgantina*. Caltanissetta: Arbor Sapientae.

Raffiotta S. (2014). Una Divinità Maschile per Morgantina. In *Le Carnet de L'ACoST*, No. 11/2014, pp.1-8.

Russo M., Senatore L.J. (2022). Low-cost 3D techniques for real sculptural twins in the museum domain. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.,* XLVIII-2/W1-2022, pp.229–236. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-229-2022> (accessed 4 February 2023).

Scopigno R. et al. (2014). Digital fabrication technologies for cultural heritage (STAR) In *EG GCH 2014 - 12th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. Conference proceedings.* Darmstadt, Germany, October 6-8, 2014, pp.75-85. Goslar: Eurographics Association.

Spangher A. et al. (2017). Geomatic 3D Modeling of a statue (also) for structural analysis and risk evaluation: the example of San Giovannino Martelli in Florence. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-5/W1, pp.61-68. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-61-2017> (accessed 4 February 2023).

Tiberti V. (2020). *Il museo sensoriale. L'accessibilità culturale e l'educazione artistica ed estetica per le persone con minorazione visiva nei musei del comune di Roma*. Rome: Sapienza Università.

Tucci G. et al. (2017). High quality 3D models and their use in a cultural heritage conservation project. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, pp.687-693. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-687-2017> (accessed 4 February 2023).

Visintini D., Spangher A. (2014). Il contributo della Geomatica per l'analisi strutturale dei beni culturali: l'esempio di una statua romana lesionata. In *18th National Conference ASITA. Conference proceedings*. Florence, October 14-16, 2014, pp. 1229-1236.

Authors
Mariangela Liuzzo, Università degli Studi di Enna "Kore", mariangela.liuzzo@unikore.it
Dario Caraccio, Università degli Studi di Enna "Kore", dario.caraccio@unikore.it
Laura Floriano, Università degli Studi di Enna "Kore", laura.floriano@unikore.it

To cite this chapter: Liuzzo Mariangela, Caraccio Dario, Floriano Laura (2023). Transizioni digitali e fisiche per i beni museali/Digital and Physical Transitions for Museum Asset. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp. 2894-2913.

 Isbn 9788835155119